

ОЦЕНКА ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ИЗОЛЯЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА

В. С. ДМИТРЕВСКИЙ, В. Ф. ГРАФОВ, В. М. ТАЮРСКИЙ

(Представлена научным семинаром кафедры электроизоляционной  
и кабельной техники)

В полимерной изоляции электротехнических конструкций внутренние механические напряжения возникают в процессе ее изготовления (например, ориентационные), а также за счет различия в коэффициентах линейного расширения полимера и изолируемых элементов. Наличие внутренних механических напряжений приводит к образованию микротрещин в материале. Время до пробоя изоляции, имеющей в своем объеме микротрещины, уменьшается.

В [1] показано, что отжиг полиэтилена приводит к увеличению срока жизни на импульсном напряжении. Исследование длительной электрической прочности кабелей с резиновой изоляцией [2] на переменном напряжении также показало, что воздействие механических нагрузок резко снижает время до пробоя изоляции.

Для определения величины внутренних механических напряжений в литературе приводятся различные методы: оптический, консольный [3], фотоупругости [4] (наиболее точный, но требующий достаточно сложной аппаратуры) и др. Ю. С. Первушин [5] решил задачу по определению внутренних напряжений в литой изоляции компаундированных электроэлементов цилиндрической формы.

Целью данной работы является количественная оценка внутренних механических напряжений в электроизоляционных конструкциях по результатам ее испытания на срок службы. Решение поставленной задачи основано на уравнении «кривой жизни», приведенном в работе [6].

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{D - V(Ae^{-bT}\beta fE)^2 + (\gamma\sigma)^2 \ln \frac{2De}{V(Ae^{-bT}\beta fE)^2 + (\gamma\sigma)^2}}{2KT} \right\}, \quad (1)$$

где  $D$  — энергия разрыва (диссоциации) химической связи;

$A, b, \gamma$  — постоянные, определяемые структурой и свойствами материала;

$2KT$  — средняя энергия двух атомов, образующих одну химическую связь;

$\beta$  — коэффициент, учитывающий концентрацию электрических напряженностей поля за счет неоднородностей в структуре материала;

$\tau_0$  — время релаксации колебаний атома в молекуле, равное  $10^{-13}$  сек;

$f$  — коэффициент неоднородности электрического поля;



$\sigma$ ,  $E$  — механическое напряжение и электрическая напряженность поля;

$\tau$  — время до разрушения изоляции.

Параметры уравнения (1) определяем на основе экспериментальных данных по отказам трех партий образцов при воздействии электрического поля напряженностью  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  при нормальной температуре. Величина энергии разрыва связи определялась из уравнения

$$D = 2KT \frac{\left( \ln \frac{E_2}{E_1} \right) \ln \frac{\tau_3}{\tau_0} + \frac{E_3}{E_2} \left( \ln \frac{E_1}{E_3} \right) \ln \frac{\tau_2}{\tau_0} + \frac{E_3}{E_1} \left( \ln \frac{E_3}{E_2} \right) \ln \frac{\tau_1}{\tau_0}}{\ln \frac{E_2}{E_1} + \frac{E_3}{E_2} \ln \frac{E_1}{E_3} + \frac{E_3}{E_1} \ln \frac{E_3}{E_2}}. \quad (2)$$

Выражение (2) получено в предположении, что

$$\sqrt{(Ae^{-bT} \beta f)^2 + \left( \frac{\gamma \sigma}{E} \right)^2}$$

остается постоянным в исследуемом диапазоне напряженностей электрического поля. Действительно, как показал анализ, погрешность в этом случае не превышает 13,5%. Уравнение (1) приводим к виду

$$BE \ln \frac{2e}{BE} = 1 - \frac{2KT}{D} \ln \frac{\tau}{\tau_0}. \quad (3)$$

$$B^2 = B_0^2 + \left( \frac{\gamma \sigma}{D} \right)^2 \cdot \frac{1}{E^2}. \quad (4)$$

$$B_0 = \frac{Ae^{-bT} \beta f}{D}. \quad (5)$$

Из уравнения (3) методом итераций определяем  $B$  при каждой вероятности пробоя изоляции и по среднему значению  $\bar{B}$  строим зависимость  $\bar{B}^2 = f\left(\frac{1}{E^2}\right)$ . Из полученной прямой нетрудно определить  $Ae^{-bT} \beta f$  и  $(\gamma \sigma)$ .

Испытания проводились на образцах (табл. 1) эпоксидного компаунда ЭЗК-10 и полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТФ) при длительном воздействии переменного напряжения 400 и 50 гц соответственно.

Таблица 1

Материал	Система электродов	$d_{пр}$ [мм]	$d_{пл}$ [мм]	$\Delta_{из}$ [мм]	$f$	Окружающая среда
ЭЗК-10	проволока — плоскость	0,2	16	0,5	2,4	Трансформаторное масло
ПЭТФ	плоскость — плоскость	—	30	0,020	1	Касторовое масло

Образцы испытывались партиями по 50 штук каждая. Режимы нагружения приведены в табл. 2.

Результаты расчетов параметров уравнения (1) по вышеизложенной методике приведены на рис. 1 и в табл. 3. Как видно из рис. 1, значения  $\bar{B}^2$  хорошо укладываются на прямую.



Таблица 2

Материал	$E_1 \times 10^{-6}$ в/м	$E_2 \times 10^{-6}$ в/м	$E_3 \times 10^{-6}$ в/м	$E_4 \times 10^{-6}$ в/м
ЭЗК-10	39,6	34	28,3	—
ПЭТФ	254,5	220,6	190,9	158,4

Таблица 3

Материал	$D \times 10^{+19}$ дж/св	$Ae^{-\alpha T} \beta f \times 10^{28}$ дж/св	$(\gamma \sigma) \times 10^{20}$ дж/св	$\sigma \times 10^{-7}$ н/м <sup>2</sup>
ЭЗК-10	5,33	1,5	4,28	4,28
ПЭТФ	4,5	1,1	2,5	2,5

Для большинства полимерных диэлектриков  $\gamma$  равна  $10^{-27} \frac{\text{дж}}{\text{св}} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{Н}}$ .

По-видимому, для эпоксидных компаундов и ПЭТФ  $\gamma$  будет близка к указанной величине. Для точного определения  $\gamma$  необходима постановка специальных опытов по механическим испытаниям материалов.

Полученные значения внутренних механических напряжений соизмеримы с величиной  $\sigma_{\text{разр.}}$  материалов.

Известно, что в процессе хранения происходит релаксация внутренних механических напряжений. В связи с этим нами была испытана дополнительная партия образцов из эпоксидного компаунда, подвергнутая хранению при комнатной температуре в течение 2,5 месяца изготовления. Испытания проводились при напряженности электрического поля  $48 \cdot 10^6$  в/м. Полагая, что  $B_0$  в процессе хранения не меняется, получаем  $\gamma \sigma_{\text{хр}} = 2,92 \cdot 10^{20}$  дж/св, а  $\sigma_{\text{хр}} = 2,92 \cdot 10^7$  н/м<sup>2</sup>. Проведенный эксперимент указывает на релаксацию внутренних механических напряжений с течением времени.

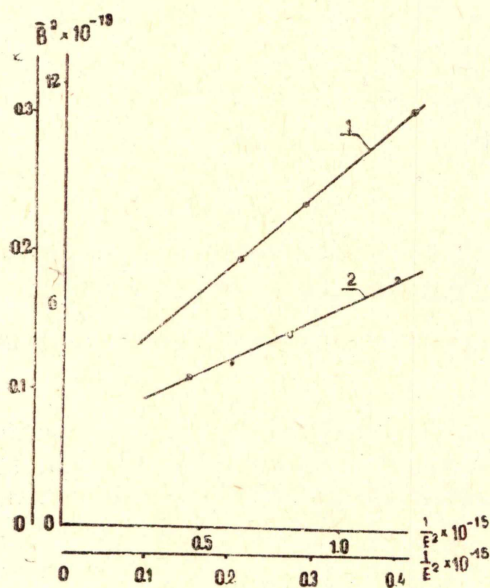


Рис. 1. Зависимость  $\bar{B}^2 = f\left(\frac{1}{E^2}\right)$  для эпоксидного компаунда ЭЗК-10 (1) и ПЭТФ пленки (2)

### Выводы

1. Предложена методика приближенной оценки внутренних механических напряжений в полимерной изоляции по результатам ее испытания на срок службы.

2. Ориентировочные расчетные значения  $\sigma$  для эпоксидного компаунда ЭЗК-10 и ПЭТФ соизмеримы с величиной  $\sigma_{\text{разр.}}$  материала.

3. При длительном хранении образцов эпоксидного компаунда происходит уменьшение  $\sigma$ .



## ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Дмитриевский, В. Ф. Вазов, И. И. Сквирская, В. Г. Сотников. Влияние отжига полиэтиленовых образцов на число импульсов до пробоя. — В сб.: «ЭП. Электротехнические материалы», отделение ВНИИ ЭМ (Информ-электро), М., 1972 (в печати).
2. В. С. Дмитриевский, В. А. Стрыжков. Совместное воздействие электрического напряжения и статистических деформаций на надежность изоляции гибкого кабеля типа КШВГ. — Сб. трудов НИИ КП, вып. 1, «Энергия», 1969.
3. А. Т. Санжаровский. Внутренние напряжения в покрытиях. — «Высокомолекулярное соединение», 1960, № 11.
4. М. Фрохт. Фотоупругость, М., 1948.
5. Ю. С. Первушин. К определению внутренних напряжений в литой эпоксидной изоляции компаундированных электроэлементов цилиндрической формы. — Сб. трудов Уфимского авиац. ин-та, 1970, вып. 15, стр. 95—101.
6. А. А. Воробьев, В. Ф. Графов, В. С. Дмитриевский, В. А. Лхамжапов, В. И. Меркулов. Старение твердых диэлектриков и надежность электрической изоляции. Материалы заседания IV научного совета АН СССР по теоретическим и электрофизическим проблемам электроэнергетики, Новосибирск, 1970.